

Artigos

Modelagem de níveis freáticos em uma bacia hidrográfica rural em Lontras, Alto Vale do Itajaí, SC

Modeling phreatic levels in a rural watershed in Lontras, High Itajaí Valley, SC-Brazil

Mateus Nascimento Vieira de Melo¹; Rodrigo Lilla Manzione²; Adilson Pinheiro¹; Gustavo Antonio Piazza³; Edson Torres¹; Vander Kaufmann¹✉

¹ Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB), Blumenau, SC

² Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã, SP

³ Secretaria de Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDE) - Governo de Santa Catarina

✉ mateusnvm@gmail.com, lilla.manzione@unesp.br, pinheiro@furb.br, gustavoapiazza@gmail.com, ettortorres@gmail.com, ambi-tec.amb@gmail.com

Palavras-chave:

Monitoramento.
Níveis freáticos.
Função de impulso resposta.
Modelo PIRFICT.

Keywords:

Monitoring.
Phreatic levels.
Impulse response functions.
PIRFICT model.

Revisado por pares.

Recebido em: 09/03/2020.

Aprovado em: 07/05/2020.

Resumo

Esse estudo analisou o comportamento de níveis freáticos em uma bacia hidrográfica rural localizada no município de Lontras, Alto Vale do Itajaí, Santa Catarina, sul do Brasil. Os níveis freáticos são monitorados em 3 poços (PZMC localizado em floresta ciliar e PZ2127 e PZ3 em pastagem). A precipitação e as cotas fluviométricas também são monitoradas, sendo as cotas referentes a estação fluviométrica instalada próxima ao PZ2127. A série de evapotranspiração de referência diária foi calculada pelo método de Samani. O monitoramento foi realizado no período de 01 de janeiro de 2012 a 15 de julho de 2019, somando 7,5 anos de dados. Realizou-se uma análise exploratória e uma análise de tendências dos níveis freáticos. A simulação dos níveis freáticos foi desenvolvida com o modelo Predefined Impulse Response Function In Continuous Time (PIRFICT), para o período de 31 de dezembro de 2014 a 19 de janeiro de 2016. Verificou-se uma tendência significativa de decaimento dos níveis do PZMC e do PZ3, e uma tendência significativa de elevação dos níveis do PZ2127. O modelo PIRFICT possibilita um ajuste aceitável para os níveis freáticos. Os erros foram baixos e foi possível caracterizar a relação dinâmica de impulso resposta entre as variáveis explicativas e os níveis observados. As informações obtidas através do monitoramento e modelagem dos níveis freáticos mostram-se necessárias para o gerenciamento dos recursos hídricos locais, planejamento e tomada de decisão.

Abstract

This study analyzed the behavior of phreatic levels in a rural watershed located the municipality of Lontras, High Itajaí Valley, Santa Catarina, Southern Brazil. Phreatic levels are monitored by 3 wells (PZMC located in riparian forests and PZ2127 and PZ3 in pasture areas). Rainfall and fluviometric level are also monitored. Fluviometric station is located near PZ2127. Daily evapotranspiration was calculated using the Samani method. Monitoring was performed from January 1, 2012 to July 15, 2019, combining 7.5 years of data. An exploratory data analysis and a trend analysis of groundwater levels was performed. Simulation was performed with the PIRFICT model (from December 31, 2014 to January 19, 2016). Trend analysis identified significant decay trends for PZMC and PZ3, and elevation trends for PZ2127. The PIRFICT model presented acceptable adjustments. The errors were low and it was possible to characterize the dynamic impulse response relationship between the explanatory variables and the observed levels. The information obtained from the phreatic levels monitoring and modeling proved to be necessary for the local groundwater resources management, providing support for planning and decision making.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v34i2.29810>

1. INTRODUÇÃO

A água subterrânea é a principal fonte de água para a agricultura e atividades humanas em regiões áridas e semiáridas, especialmente onde não existem rios ou outros corpos hídricos superficiais (BANDER *et al.*, 2019). Os aquíferos freáticos são formações geológicas não confinadas que armazenam e transmitem água, e apresentam o nível da água como fron-

teira superior, em contato direto com a pressão do ar atmosférico (CLEARY, 2007).

Nas últimas décadas, observou-se um aumento da demanda pela água subterrânea devido às mudanças climáticas e a maior utilização das águas (WANG *et al.* 2014), demandando maior atenção à avaliação do comportamento destes sistemas (WADA *et al.* 2017). Os fatores que influenciam a dispo-

nibilidade da água subterrânea são precipitação, evapotranspiração, nível da água em corpos superficiais, bombeamento e variações barométricas (BAKKER; SCHAARS, 2019). Formações e estruturas geológicas, profundidade do intemperismo, declividade, forma do relevo e topografia também podem exercer influência nestes sistemas (YEH *et al.*, 2009). Mudanças nos usos da terra influenciam a quantidade desse recurso uma vez que impactam diretamente fatores como evapotranspiração, estrutura do solo, profundidade das raízes e interceptação (VAERET *et al.*, 2009).

Bacias hidrográficas representativas objetivam a realização de experimentos e observações para fornecimento de dados comparativos acerca dos processos hidrológicos e para compreensão dos impactos de alterações provocadas nestes espaços (PIAZZA, 2019). As bacias hidrográficas rurais são aquelas que apresentam áreas destinadas ao cultivo ou pastagem e podem apresentar alterações no comportamento do escoamento em decorrência das alterações dos usos da terra.

O monitoramento dos níveis freáticos para estudo do comportamento de aquíferos produz conhecimentos para conservação, para a execução de projetos de proteção ambiental e para o desenvolvimento sustentável (OAS/GEF, 2001). O monitoramento e posterior aplicação de modelos hidrológicos podem auxiliar a compreensão da dinâmica dos sistemas aquáticos e subsidiar a elaboração de orientações e de políticas públicas com vistas ao planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Técnicas de modelagem baseadas em dados de monitoramento podem gerar informações para subsidiar a ocupação territorial, por exemplo, auxiliando a escolha de locais mais adequados para as atividades agropecuárias na bacia hidrográfica (MANZIONE; MARCUZZO; WENDLAND, 2012). Estas informações podem ser aplicadas em áreas estratégicas e serem incluídas como ferramentas de gestão nos planos de recursos hídricos, instrumentos da Política Nacional dos Recursos Hídricos do Brasil, definida pela Lei nº 9.433, de 1997 (MANZIONE, 2018).

Para tanto, são demandadas técnicas de modelagem que considerem a variabilidade e a incerteza dos componentes hidrológicos, o que geralmente não é considerado por modelos determinísticos. Análises da água subterrânea baseadas nas previsões das oscilações de seus níveis permitem a previsão do risco associado a eventos extremos, que podem ser influenciados por impactos antropogênicos e mudanças climáticas (KARAMOUZ; NAZIF; FALAHI, 2013). Uma maneira de modelar níveis freáticos é através de métodos estocásticos e variáveis aleatórias, em que processos hidrológicos são determinados a partir de valores passados e em intervalos de probabilidades descritos como resultado de experimentos probabilísticos (SILVA; MANZIONE, 2016). A aplicação deste método permite o conhecimento da relação entre impulsos de entrada e saída (BAKKER; SCHAARS, 2019), neste caso, a relação entre variáveis ambientais e níveis freáticos.

O modelo *Predefined Impulse Response Function In Continuous Time* (PIRFICT) trabalha com tempo contínuo e tem as características de resposta de sistemas de águas subterrâneas estimadas por funções de impulso e resposta. Estudos recentes sobre esta temática que utilizaram o modelo PIRFICT vêm sendo desenvolvidos, como Yihdego e Webb (2010), Lehsten, von Asmuth, e Michael Kleyer (2011), Yihdego e Webb (2011), Gunawardhana e Kazama (2012), Robson e Webb (2012),

Nava e Manzione (2015), Hocking e Kelly (2016), Omran (2016), Manzione, Soldera e Wendland (2017) e Manzione (2018).

Este estudo objetivou compreender o comportamento de níveis freáticos na bacia hidrográfica do ribeirão Concórdia, Lontras, Santa Catarina, utilizando o modelo PIRFICT. Procurou-se avançar o conhecimento da dinâmica das águas subterrâneas locais e, conseqüentemente, do balanço hidrológico, para apoiar o planejamento e a tomada de decisão envolvendo recursos hídricos subterrâneos na bacia hidrográfica e na região.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica do Ribeirão Concórdia, localizada no município de Lontras, Santa Catarina, sul do Brasil. A bacia hidrográfica ocupa uma área de 30,93 km² e possui exutório nas coordenadas de latitude 27°10'54,19"S e longitude 49°31'37,28"O. Escolheu-se esta bacia hidrográfica como objeto de estudo devido a instrumentação de monitoramento ambiental instalada, ao seu histórico de estudos realizados desde o ano de 2005 e aos dados disponíveis para análise. O monitoramento é realizado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Fundação Universidade Regional de Blumenau (PPGEA/FURB).

As propriedades rurais, caracterizadas como pequenas (até 72 ha) e médias (de 72 a 270 ha), possuem boa distribuição ao longo da bacia hidrográfica e ocupam, aproximadamente, 50% da área total (LUBITZ; PINHEIRO; KAUFMANN, 2013; PIAZZA *et al.*, 2014). O levantamento do uso e da ocupação da terra apresentado por Piazza (2019) indicou que 45,4% da área da bacia hidrográfica é coberta por floresta nativa, 32,1% destinada a atividades agropecuárias, 14,0% composta por florestas plantadas, 4,6% coberta por floresta em estágio inicial de regeneração, 1,0% de massas de água, 1,7% com solo exposto e 1,2% de área construída. São adotadas práticas de plantio direto, cultivo mínimo e plantio convencional como manejo do solo (LAUS NETO, 2005). As principais culturas são: milho, feijão, arroz, fumo, tomate e repolho. As florestas plantadas são compostas de eucalipto e pinus, e as áreas destinadas a pastagem, por sua vez, são caracterizadas por culturas perenes com constante presença de gado (TORRES, 2016).

A bacia hidrográfica apresenta altitudes que variam entre, aproximadamente, 300 e 900 m em relação ao nível do mar e apresenta características fisiográficas ondulada e montanhosa a montante, e plana a jusante (LOWEN, 2016). A bacia hidrográfica encontra-se, em sua maior parte, sobre a unidade Taciba (Paleozóico). A área de cabeceira encontra-se sobre a unidade Rio Bonito (Paleozóico) (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 1986 *apud* PIAZZA, 2019). A área de estudo pertence ao grupo de formação geológica Itararé, com suítes intrusivas graníticas. Um de seus subgrupos, localizado na porção inferior dessa formação, é da formação Rio do Sul, que apresenta folhetos e argilitos cinza-escuros. Sobre eles, encontram-se diamictitos acinzentados, com matriz arenosa, intervalados com arenitos muito finos. Estes, são cobertos por folhelhos, geralmente várvidos, argilitos, ritmitos e siltitos (EMBRAPA, 2004). Os solos derivaram desta formação geológica e possuem a seguinte distribuição em percentagem de área: cambissolos -

62,2%, argissolos - 32,9% e gleissolos - 0,9% (PIAZZA et al., 2014).

O clima, de acordo com Strahler, é subtropical, com verões quentes e úmidos, e invernos frios e secos. A temperatura e a precipitação médias anuais são de 20 °C e 2000 mm, respectivamente. O clima é classificado como Cfa (clima subtropical úmido), apresentando temperatura média no mês mais frio inferior a 18 °C e temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C (ALVARES et al., 2013).

2.2. Dados utilizados

2.2.1. Dados de níveis freáticos

Utilizou-se dados referentes a 3 poços de monitoramento instalados na bacia hidrográfica sob monitoramento do

PPGEA/FURB. O poço PZMC está localizado em floresta ciliar e os poços PZ2127 e PZ3 em pastagem. O PZ2127 está localizado próximo ao exutório da bacia hidrográfica (Figura 1). Os poços são equipados com sensores de nível hidrostático conectados a *dataloggers*. Os níveis freáticos foram registrados a cada 30 min, de 01 de janeiro de 2012 a 15 de julho de 2019. Uma caracterização do entorno dos poços pode ser observada na Figura 2. Profundidades, distâncias do rio e cotas altimétricas dos poços são apresentadas na Tabela 1. Os 3 poços encontram-se na unidade geológica Taciba (Paleozóico) e formação geológica Itararé (subgrupo Rio do Sul). Em relação ao tipo de solo, o PZMC e o PZ3 encontram-se em área de Cambissolo háplico Alumínico típico, enquanto o PZ2127 encontra-se em área de Gleissolo háplico Ta Alumínico típico (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 1986 *apud* PIAZZA, 2019).

Figura 1 - Localização dos poços de monitoramento e dos pluviógrafos na bacia hidrográfica do Ribeirão Concórdia, Lontras, Santa Catarina, sul Brasil

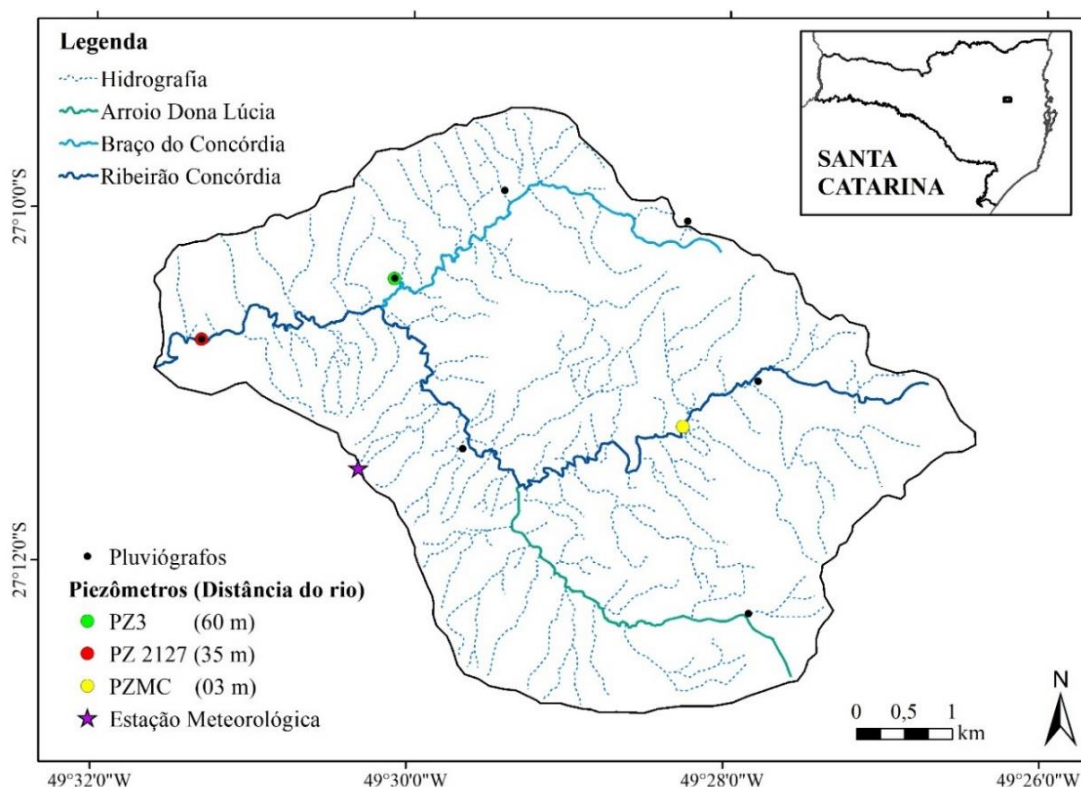


Figura 2 - Entornos dos poços de monitoramento



Tabela 1 - Informações dos poços de monitoramento

Poço	Uso da terra	Coordenadas geográficas	Profundidade (m)	Distância do rio (m)	Cota altimétrica (m)
PZMC	Floresta ciliar	27° 11' 20'' S 49° 28' 28'' O	2,6	3	433
PZ2127	Pastagem	27° 11' 26'' S 49° 29' 31'' O	5,1	35	339
PZ3	Pastagem	27° 10' 45'' S 49° 31' 17'' O	3,8	60	372

2.2.2. Dados hidroclimatológicos

Utilizou-se séries históricas de precipitação registradas em 8 pluviógrafos monitorados pelo PPGEA/FURB, sendo 7 deles do tipo báscula e o outro de pesagem, localizado na estação meteorológica (Figura 1).

Os pluviógrafos do tipo báscula e de pesagem encontram-se instalados a 1,5 m e 0,5 m da superfície do solo, respectivamente. Estes equipamentos são ajustados para leitura a cada 5 min, sendo os dados armazenados em *dataloggers*. Os dados disponíveis correspondem ao período de 01 de janeiro de 2012 a 15 de julho de 2019. Optou-se pela utilização de médias diárias dos pluviógrafos como forma de uniformizar e garantir dados de precipitação da bacia hidrográfica para todo período analisado.

A série de evapotranspiração de referência diária foi calculada pelo método de Samani (SAMANI, 2000), utilizando dados de temperaturas mínimas e máxima da estação meteorológica de Ituporanga (código A863), disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Optou-se por esta estação devido à sua proximidade da bacia hidrográfica objeto deste estudo (aproximadamente 30 km de distância), se comparada as demais estações presentes no banco de dados. O método de Samani é expresso por (Equação 1):

$$ET_o = 0,0135 \cdot K \cdot Ra \cdot \sqrt{T_{max} - T_{min}} \cdot (T_{med} + 17,8) \quad (1)$$

em que:

- ET_o é a evapotranspiração de referência (mm.dia⁻¹);
- K é um coeficiente igual a 0,162 para regiões continentais e 0,190 para regiões costeiras;
- Ra é a radiação solar no topo da atmosfera, que varia com o mês e a latitude do local, expressa em equivalente de evaporação (mm.dia⁻¹);
- T_{max} , T_{min} e T_{med} são as temperaturas máxima, mínima e média, respectivamente (°C).

Utilizou-se, ainda, dados de cotas obtidos em estação fluviométrica instalada na direção perpendicular do PZ2127 e sob monitoramento do PPGEA/FURB. Esta seção dispõe de sensor automático de nível, com um codificador de eixo operado por flutuador, que registra estes dados em intervalos de 1 h. Os dados disponíveis são relativos ao período de 01 de janeiro de 2012 a 15 de julho de 2019.

2.3. Análise exploratória dos níveis freáticos

Realizou-se uma análise estatística dos níveis freáticos para o entendimento do conjunto de dados e de suas variações mais

significativas. Os cálculos foram realizados para uma frequência diária, para o período compreendido entre 01 de janeiro de 2012 e 15 de julho de 2019. Foram utilizadas média aritmética, valores mínimo e máximo, e desvio padrão.

2.4. Análise de tendências

A análise de tendências das séries de níveis freáticos diários, precipitação mensal e evapotranspiração mensal (de 01 de janeiro de 2012 a 15 de julho de 2019) foi executada por meio de 2 testes: a análise da linha de tendência e o teste de Mann-Kendall. Neste último teste, a existência de uma tendência estatisticamente significativa é avaliada pelo valor de Z . Para testar a tendência crescente ou decrescente com nível de significância de α , a hipótese nula é rejeitada caso o valor absoluto de Z for maior que $Z_{\alpha/2}$ (MANN, 1945; KENDALL, 1975).

2.5. Modelagem de níveis freáticos

O modelo PIRFICT, implementado no *software* Menyanthes, pacote do Matlab, foi utilizado para simulação dos níveis freáticos (VON ASMUTH *et al.*, 2012). Utilizou-se as séries históricas de precipitação, evapotranspiração e cota fluviométrica como variáveis de entrada, e os modelos foram calibrados com base nos níveis freáticos do PZMC, PZ2127 e PZ3. Foram utilizados dados em frequência diária. O período analisado foi de 31 de dezembro de 2014 a 19 de janeiro de 2016. No modelo PIRFICT, uma série de saída origina-se de uma função de transferência em tempo contínuo aplicada ao pulso de entrada (VON ASMUTH *et al.*, 2008).

Considerando um sistema linear e sem qualquer influência de perturbação, uma série de nível freático pode ser obtida a partir da transformação de uma série de precipitação excedente através de uma função escrita como uma convolução integral (Equações 2, 3 e 4). Esta transformação é totalmente governada pela função de impulso resposta (VON ASMUTH; BIERKENS; MAAS, 2002):

$$h(t) = h^*(t) + d + r(t) \quad (2)$$

$$h^*(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau)\theta(t-\tau)\partial\tau \quad (3)$$

$$r(t) = \int_{-\infty}^t \theta(t-\tau)\partial W(\tau) \quad (4)$$

em que:

- $h(t)$ é a altura do nível freático observada (medida) no tempo t [T];

- $h^*(t)$ é o nível freático predito no tempo t somado ao excedente de precipitação relativa a d [L];
- d é $h^*(t)$ sem o acréscimo da precipitação, relativo à superfície do solo [L];
- $r(t)$ é a série de resíduos [L];
- $p(t)$ é a intensidade do excedente de precipitação no tempo t [L/T];
- $\theta(t)$ é a função de transferência de impulso resposta [-];
- $\emptyset(t)$ é a função de impulso resposta do ruído [-];
- $W(t)$ é um processo de ruído branco contínuo (Wiener), assumindo as propriedades $E[dW(t)]=0$, $E\{[dW(t)]^2\}=dt$, $E[dW(t_1)dW(t_2)]=0$, $t_1 \neq t_2$.

Desse modo, o nível d é obtido da seguinte forma (Equação 5) (VON ASMUTH, 2012):

$$d = \frac{\sum_{i=0}^N h(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N h^*(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N r(t_i)}{N} \quad (5)$$

em que:

- N é o número de observações (medições) dos níveis freáticos.

A área e a forma da função de impulso resposta variam de acordo com características hidrológicas de cada bacia hidrográfica e ponto de monitoramento. Os parâmetros fisicamente embasados estimados pelo modelo PIRFICT podem ser definidos segundo von Asmuth, Bierkens e Maas (2002) (Equações 6 e 7):

$$\theta(t) = A \frac{a^n t^{n-1} e^{-at}}{\Gamma(n)} \quad (6)$$

$$\varphi(t) = \sqrt{2\alpha\sigma_r^2} e^{-at} \quad (7)$$

em que:

- A , a e n são parâmetros da curva ajustada;
- $\Gamma(n)$ é a função Gamma;
- α controla a taxa de decaimento de $\varphi(t)$;
- σ_r^2 é a variância dos resíduos.

De acordo com von Asmuth e Knotters (2004), esses parâmetros apresentam sentido físico. O parâmetro A relaciona-se com a resistência à drenagem, em que a área da função de impulso resposta é igual a razão entre a altura média do lençol freático e a recarga média. O parâmetro a relaciona-se com o coeficiente de armazenamento do solo (porosidade). O parâmetro n relaciona-se com o tempo de convecção e dispersão da precipitação através da zona não saturada, e demonstra o número de reservatórios. O parâmetro α é igual ao inverso do coeficiente de reservatório.

2.5.1. Avaliação das calibrações dos modelos

As métricas mais comuns para expressar a qualidade das calibrações dos modelos são o percentual de variância explicada (EVP) pelo modelo e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) (BAKKER; SCHAARS, 2019). A raiz das inovações quadráticas médias (RMSI) também pode ser utilizada e representa o erro do modelo entre um instante t em relação à $t - 1$. Foram utilizados estes 3 parâmetros. Foram utilizadas também equações lineares de linha de tendência e coeficientes de determinação (R^2) para análise dos níveis freáticos observados (medidos) e calculados. Fez-se ainda uma análise dos erros dos níveis calculados a partir de gráficos de dispersão para os respectivos níveis observados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise exploratória dos níveis freáticos

As análises estatísticas para as séries temporais de níveis freáticos observadas são apresentadas na Tabela 2.

Observa-se que os níveis são mais superficiais no PZMC e PZ3. As amplitudes foram maiores conforme o aumento da distância do rio. Os desvios padrão apresentaram comportamento semelhante, ou seja, os dados apresentaram-se mais próximos das médias quanto mais pertos os poços encontram-se do rio.

Tabela 2 - Estatísticas calculadas para as séries temporais de níveis freáticos observados (medidos)

Poço	MÉD (m)	MÍN (m)	MÁX (m)	DP (m)
PZMC	-2,07	-2,53	-1,41	0,14
PZ2127	-4,34	-4,87	-2,07	0,32
PZ3	-1,77	-3,17	-0,10	0,56

MÉD: valor médio; MÍN: valor; mínimo; MÁX: valor máximo DP: desvio padrão.

3.2. Análise de tendências

Na Figura 3 são apresentadas as variações dos níveis freáticos dos 3 poços de acordo com a equação ajustada da linha de tendência linear. O coeficiente angular para os níveis do PZMC e PZ3 foram negativos, indicando tendências decrescentes. Em contrapartida, para os níveis do PZ2127 este coe-

eficiente foi positivo, sugerindo uma tendência crescente. Todas as tendências mostraram-se significativas para o nível de significância $\alpha = 0,05$ (Tabela 3). Em contraponto, a análise de tendência para a precipitação mensal e para evapotranspiração mensal (Figura 4) não apresentou tendências significativas (Tabela 3).

Figura 3 - Tendências geradas para os níveis freáticos

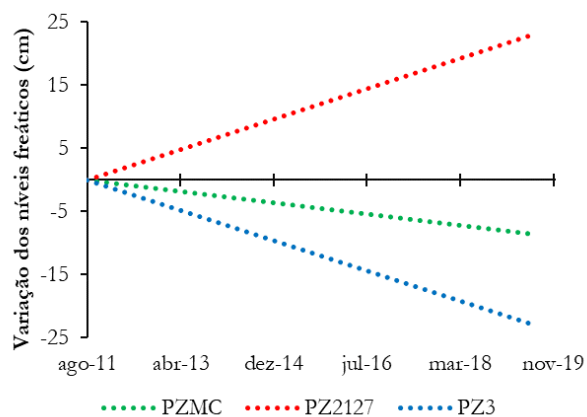


Figura 4 - Tendências geradas para precipitação mensal e evapotranspiração mensal

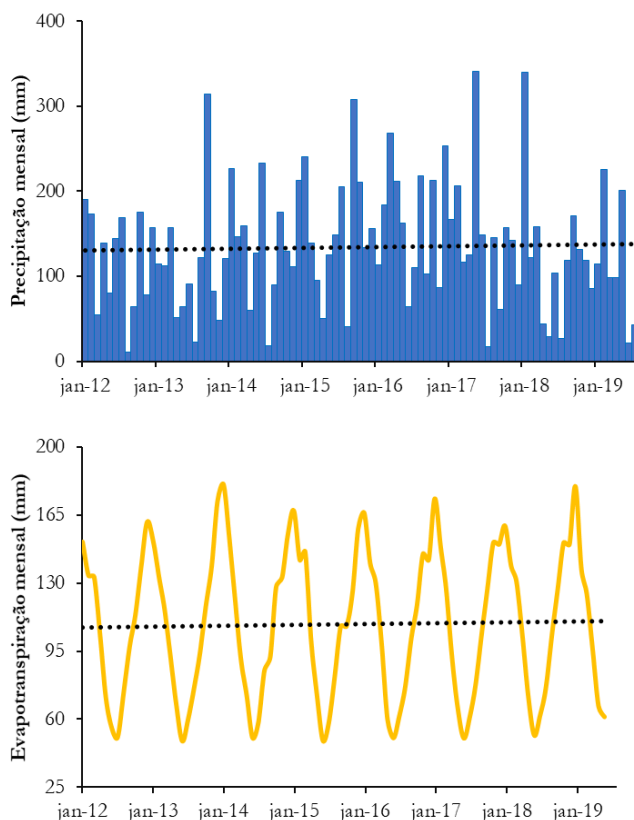


Tabela 3 - Equações lineares de linha de tendência, coeficientes de determinação (R^2) e resultados do teste de Mann-Kendall para os níveis freáticos, precipitação mensal e evapotranspiração mensal

Parâmetro	Linha de tendência linear			Menn-Kendall
	Equação	Coefficiente de determinação (R^2)	Z	
Nível freático - PZMC	$y = -0,00x - 0,99$	0,02	-6,73	*
Nível freático - PZ2127	$y = 0,00x - 7,93$	0,05	13,21	*
Nível freático - PZ3	$y = 0,00x + 1,58$	0,01	-4,83	*
Precipitação mensal	$y = 0,00x + 22,23$	0,00	0,98	-
Evapotranspiração mensal	$y = 0,00x + 57,98$	0,00	0,30	-

(*) Nível de significância do teste de Menn-Kendall para $\alpha = 0,05$.

Segundo Healy (2010) e Lehsten, von Asmuth e Kleyer (2011), o aumento da evapotranspiração poderia explicar o decaimento dos níveis freáticos, porém não foram identificadas tendências significativas. O decaimento dos níveis para o PZMC e PZ3, localizados mais a montante da bacia hidrográfica, está relacionado à utilização da água subterrânea para abastecimento humano e atividades agropecuárias, redução da infiltração e aumento do escoamento superficial, ocasionado pelas práticas de manejo do solo utilizadas. Na bacia hidrográfica objeto do estudo, as atividades agropecuárias consolidaram-se, de maneira geral, próximo aos cursos d'água, de modo a facilitar a captação e utilização da água (PIAZZA, 2019). Contudo, existem também poços de captação de água subterrânea para estas atividades e para abastecimento humano. Dimitriou *et al.* (2017) também identificaram, através de um modelo, uma tendência de decaimento dos níveis da água em lagoas, mesmo sem uma tendência correspondente para precipitações. Bakker e Schaars (2019) atribuíram às mudanças no uso da terra e aos bombeamentos as alterações nas tendências dos níveis freáticos. Oh *et al.* (2017) identificaram as interações entre a água subterrânea e a água superficial, o bombeamento para uso agrícola e a precipitação como

principais fatores que podem exercer influência sobre a recarga de um aquífero. Bustamante, Aragonés e Afán (2016) mostraram que áreas com menores graus de alteração do uso da terra tendem a preservar os níveis freáticos. A elevação dos níveis do PZ2127, localizado no exutório da bacia hidrográfica, está relacionada a menor declividade encontrada nesta área, que tende a intensificar o processo de infiltração da água no solo. Resultado semelhante foi obtido por Algaydi *et al.* (2019) que identificaram que áreas mais propensas a elevação dos níveis freáticos e armazenamento de água subterrânea são aquelas com menores declividades.

3.3. Modelagem de níveis freáticos

Utilizando as séries históricas hidroclimatológicas diárias (precipitação, evapotranspiração e cota fluviométrica) apresentadas na Figura 5, o modelo PIRFICT foi calibrado com base nos níveis freáticos.

A Figura 6 apresenta que as linhas ajustadas acompanham a tendência dos níveis freáticos observados. O ajuste ocorre durante todo o período analisado.

Figura 5 - Dados de precipitação diária, evapotranspiração diária e cota fluviométrica diária utilizadas para calibração do modelo PIRFICT

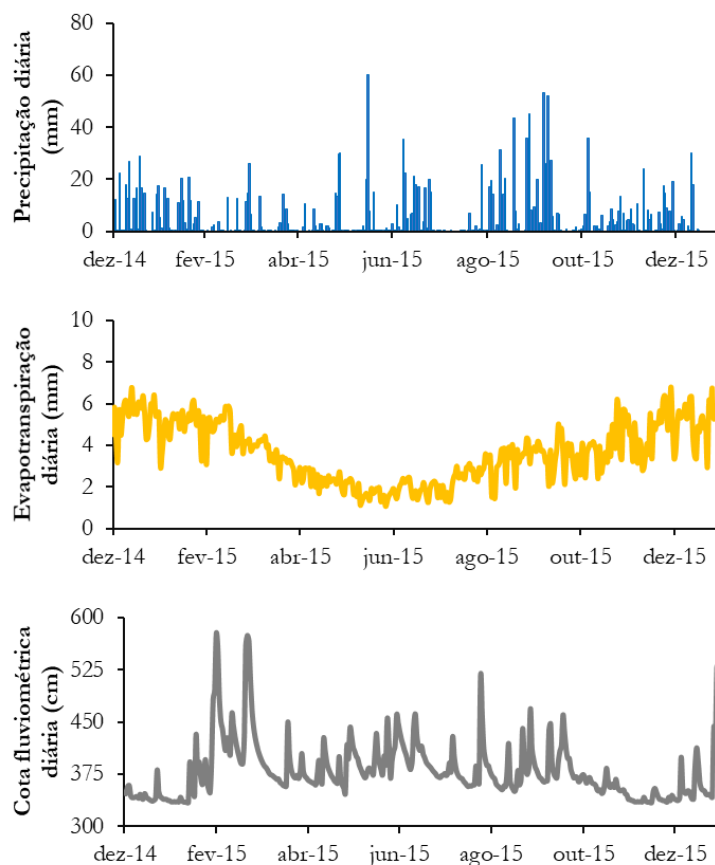
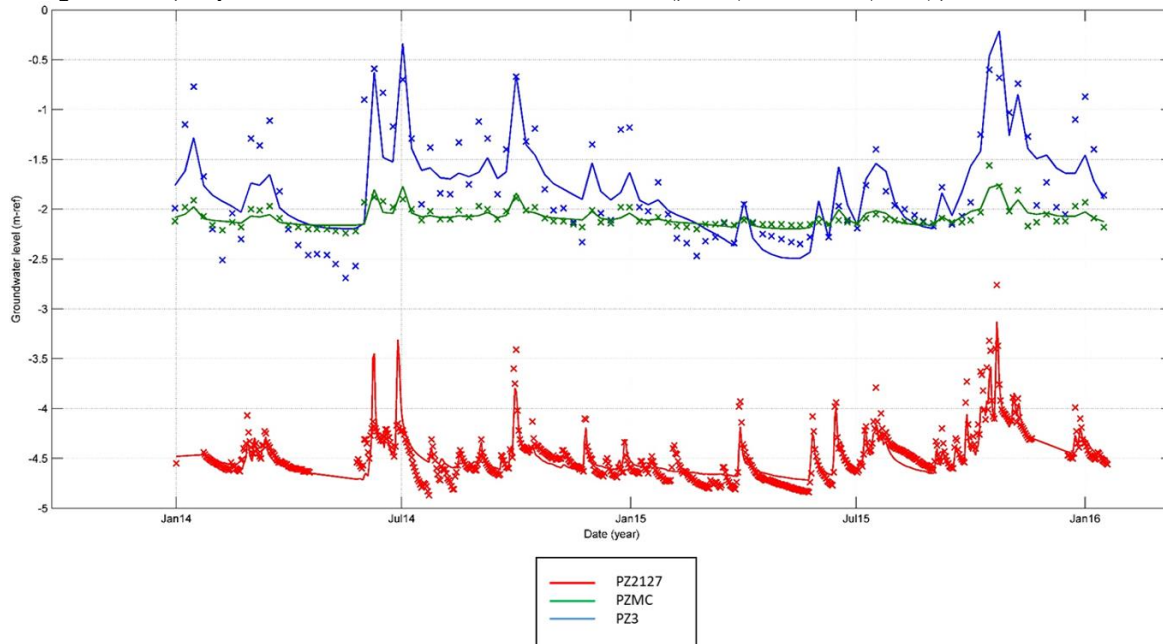


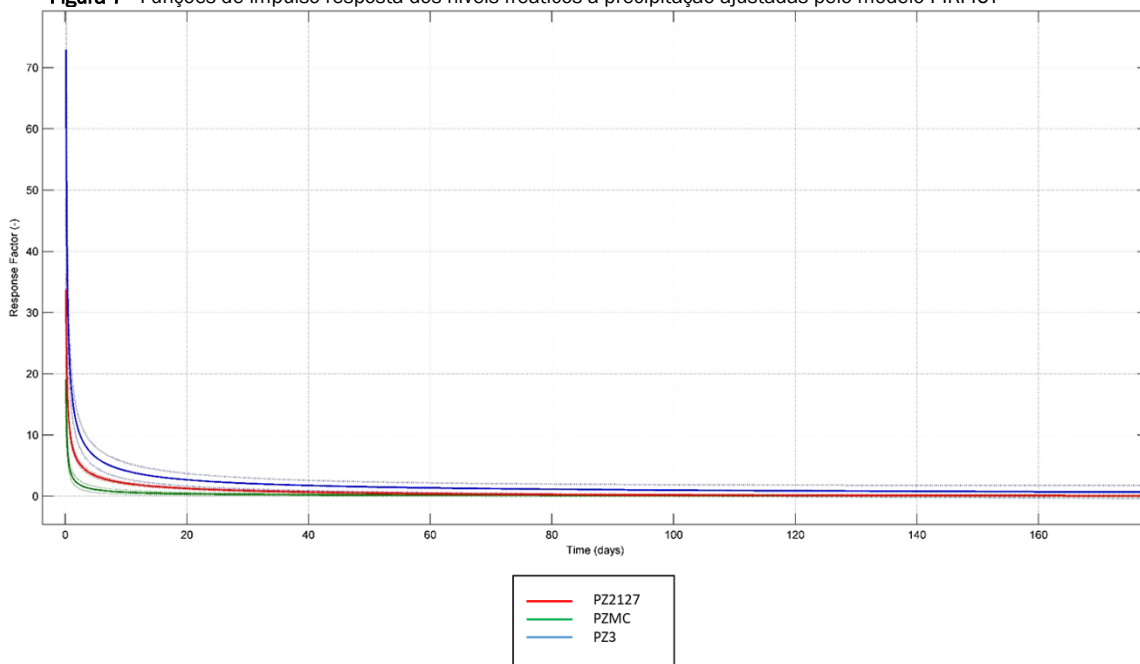
Figura 6 - Comparação entre os dados de níveis freáticos observados (pontos) e calculados (linhas) pelo modelo PIRFICT



A Figura 7 apresenta os fatores de resposta e os períodos, em dias, em que os níveis freáticos respondem aos estímulos das precipitações, bem como respectivos intervalos de confiança

(linhas claras). As funções de impulso resposta ajustadas aos dados caracterizaram uma relação dinâmica rápida entre os níveis freáticos e a precipitação (BAKKER; SCHAARS, 2019).

Figura 7 - Funções de impulso resposta dos níveis freáticos à precipitação ajustadas pelo modelo PIRFICT



O PZMC apresentou a resposta mais rápida, seguido do PZ2127 e PZ3. Isto está relacionado as profundidades dos níveis freáticos, distâncias do rio e espessuras da zona não saturada. Poços com menores profundidade dos níveis, distância do rio e espessura da zona não saturada são mais sensíveis às variações sazonais da precipitação e evapotranspiração. Vale ressaltar que, apesar das diferentes distâncias dos poços para o rio, não foram analisados os níveis freáticos em áreas mais elevadas e mais distantes da zona de descarga. São poços com significativa relação hidrodinâmica com o rio,

o que justifica as semelhanças das respostas dos níveis. Manzione (2018) obteve resultados semelhantes. Poços mais distantes das drenagens também apresentaram maiores fatores e tempos de resposta. Por outro lado, poços mais próximos à drenagem apresentaram menor influência da precipitação, o que é justificado pela maior influência hidrodinâmica da descarga do rio, que contribui mais significativamente para alteração dos níveis freáticos.

Os caminhos da água subterrânea variam de acordo com com-

primento, profundidade e tempo de trânsito, em relação aos pontos de recarga e descarga do sistema. As áreas dos gráficos abaixo das linhas das funções de impulso resposta representam as zonas não saturadas, ou seja, o comprimento pelo qual a água deve percolar até atingir os lençóis freáticos e afetar os níveis. Este fato pode ser corroborado pelos níveis freáticos médios para o período de 01 de janeiro de 2012 a 15 de julho de 2019: -2,70, -4,34 e -1,77 m para o PZMC, PZ2127 e PZ3, respectivamente. Ressalta-se que o maior nível médio observado é no PZ3, que deveria apresentar rápida resposta à precipitação. Entretanto, os resultados não indicam isto devido aos relevos dos terrenos em que os poços estão instalados (SOLDERA; MANZIONE, 2012). O PZ3 encontra-se em área com maior declividade e maior cota altimétrica, se comparado aos demais.

Observa-se que, de forma geral, a área de estudo se caracteriza por um sistema de resposta rápida aos eventos de precipitação e possui baixa capacidade de armazenamento de água. Os fatores relacionados as respostas dos níveis freáticos ficam nulos ou praticamente nulos decorridos, aproximadamente, 60 dias em todos os poços. Isto pode ser explicado pelo fato de os níveis serem pouco profundos, apresentando uma resposta mais rápida aos estímulos da precipitação. Ou-

tro fator que pode explicar essa característica é a textura do solo (SILVA; MANZIONE, 2016). Segundo Healy (2010), solos com materiais mais grosseiros apresentam maior permeabilidade, ou seja, propriedade de transmissão do meio e a interconexão dos poros, que diz respeito à condutividade e transmissividade hidráulica. Assim sendo, estas áreas devem ser mais eficientes na transmissão da água e apresentar resposta mais rápida à precipitação.

O processo de oscilação dos níveis freáticos caracterizado pelo modelo PIRFICT é influenciado em grande parte pela precipitação, diferentemente da evapotranspiração e do escoamento fluvial. Isto caracteriza um sistema de drenagem efluente, ou corrente de ganho.

3.3.1. Avaliação das calibrações dos modelos

Os resultados das calibrações são apresentados na Tabela 4. Os 3 poços apresentaram um EVP médio de 69,95%, sendo o pior ajuste igual a 67,06% (PZMC) e o melhor ajuste igual a 75,64% (PZ2127). Os valores das RMSE e RMSI foram considerados baixos, o que indica ajustes aceitáveis. Os RMSE foram 6, 12 e 31 cm para o PZMC, PZ2127 e PZ3, respectivamente. Os RMSI foram 7, 9 e 31 cm, respectivamente.

Tabela 4 - Estatísticas das calibrações do modelo PIRFICT para as séries temporais de níveis freáticos

Poço	EVP (%)	RMSE (m)	RMSI (m)
PZMC	67,06	0,06	0,07
PZ2127	75,64	0,12	0,09
PZ3	67,14	0,31	0,31

EVP: percentual de variância explicada pelo modelo; RMSE: raiz do erro quadrado médio; RMSI: raiz das inovações quadráticas médias.

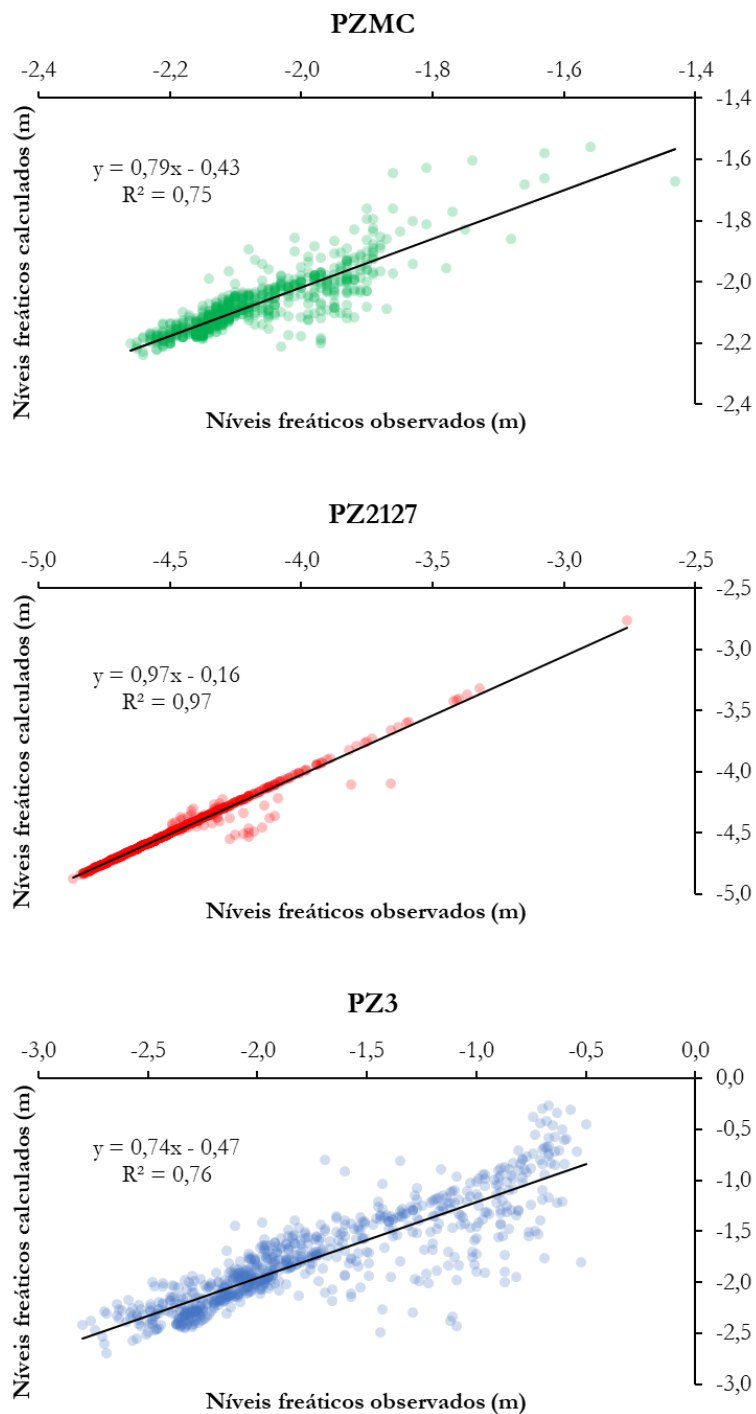
A Figura 8 apresenta a relação entre os níveis freáticos observados e calculados através da calibração do modelo PIRFICT. Os coeficientes angulares das equações das linhas de tendência lineares para os 3 poços foram menores que 1, indicando uma subestimação dos dados de níveis calculados pelo modelo. Os coeficientes de determinação (R^2) entre os níveis observados e calculados também são apresentados na Figura 8.

Os ajustes dos dados realizados para os poços indicam que a simulação do modelo PIRFICT, com base nos dados de precipitação, evapotranspiração e cota fluviométrica, representou as principais características dos níveis freáticos. As diferenças dos valores de RMSE e RMSI encontrados no PZMC e PZ3, que apresentaram EVP semelhantes, está relacionada à amplitude da variação dos níveis, sendo esta superior para o PZ3. Teramoto e Chang (2018), por exemplo, atribuíram maior variação a áreas mais distantes da zona de descarga. De acordo com von Asmuth (2012), esta amplitude pode ainda ser influenciada pela profundidade dos níveis freáticos, condições físicas locais, vegetações e usos da terra. Hocking e Kelly (2016) e Yihdego e Webb (2011) justificam EVP menores que 70% através de variáveis locais como a captação de água subterrânea sem medição, erros de medição nos dados de entrada do modelo e modificações nos usos da terra. Bakker e Schaars

(2019) mencionam, dentre outros fatores, problemas relacionados à instalação dos poços, calibrações dos sensores e pluviógrafos como justificativa para resultados menos precisos. Soldera e Manzione (2012) apresentaram ajustes com EVP variando entre 65 e 91% e observaram que em séries curtas é normal a ocorrência de variações como às observadas. Manzione, Soldera e Wendland (2017) obtiveram bons ajustes à série temporal observada, com EVP superior a 68% em todos os casos estudados. Estes mesmos autores chegaram a erros baixos para o modelo, com valores de RMSE variando de 0,05 a 1,16 m e RMSI de 0,04 a 0,41 m.

O melhor ajuste obtido foi para o PZ2127, fato que está relacionado à localização da estação fluviométrica relativamente próxima ao poço. Para estimativa de cenários mais precisos, recomenda-se, quando disponíveis, a utilização destes dados com esta característica como entrada no modelo. Por exemplo, Yihdego e Webb (2011) obtiveram melhores ajustes utilizando 3 variáveis de entrada no modelo, se comparados aos resultados da inserção de 2 variáveis. Robson e Webb (2012) e Robson (2015) sugerem que a utilização de cotas de corpos hídricos superficiais melhora o desempenho do modelo e isto evidencia o impacto deles nos níveis freáticos.

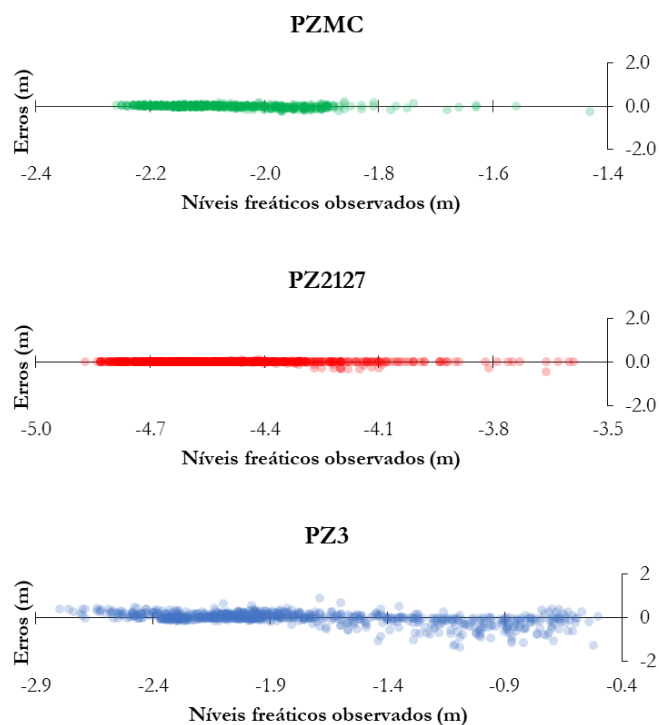
Figura 8 - Relação entre os níveis freáticos observados (medidos) e calculados pelo modelo PIRFICT



A Figura 9 apresenta os gráficos de dispersão dos erros dos níveis freáticos calculados pelo modelo PIRFICT para os respectivos níveis observados. De maneira geral, pode-se observar que os erros tendem a ser mais elevados à medida que maiores são os níveis observados. Isto indica que para cená-

rios extremos de níveis pode ser interessante a correção dos dados gerados pelo modelo. Estas incertezas têm origem nas bases de dados climatológicos, na precisão dos sensores, nas estimativas ou no próprio modelo e em suas calibrações.

Figura 9 - Dispersão dos erros dos níveis freáticos calculados pelo modelo PIRFICT para os respectivos níveis observados



De maneira geral, tanto no que diz respeito a análise de tendências como a avaliação das calibrações dos modelos, não é possível inferir sobre efeitos da unidade e formação geológicas, e tipo de solo. A unidade e a formação geológicas são as mesmas para os poços e o tipo de solo varia apenas no PZ2127, mas, com ele, varia também a profundidade do poço, a distância do rio e a declividade, o que dificulta este tipo de análise. A cobertura vegetal e o uso e ocupação da terra, bem como a declividade, oferecem indicativos para os comportamentos observados na análise de tendências. Em relação a caracterização das respostas dos níveis freáticos, a pouca profundidade dos 2 tipos de solos em que se encontram os 3 poços e a distância dos poços para o rio mostraram-se como fatores que caracterizam a resposta rápida do sistema à precipitação. Para avaliação das calibrações dos modelos, o fator que exerceu maior influência foi a proximidade da estação fluviométrica do PZ2127. A utilização das cotas fluviométricas impulsionou o melhor desempenho da calibração dos níveis neste poço.

Dados sobre monitoramento de níveis freáticos, uma vez transformados em informações sobre a dinâmica da água subterrânea utilizando modelos estatísticos como os demonstrados neste estudo, são importantes na gestão dos recursos hídricos, já que melhoram o entendimento sobre os processos hidrológicos da bacia hidrográfica e da região. Assim, subsidiam ações relativas ao planejamento e tomada de decisões em recursos hídricos. Conhecer a velocidade de resposta do nível da água subterrânea à eventos de precipitação, por exemplo, permite entender processos de inundação, de degradação de lençol freático, o potencial de exploração por meio de poços e a descarga subterrânea em corpos hídricos superficiais. Entender qual o papel da precipitação no processo de oscilação do nível freático possibilita o entendimento de quais componentes do ciclo hidrológico precisam de monitoramento

adicional para fins de balanço hídrico, considerando a precipitação como a principal entrada de água no sistema. Em épocas de incerteza climática e rupturas no ciclo hidrológico, é importante conhecer se as bacias hidrográficas são deficitárias, balanceadas ou com excesso em termos de balanço hídrico para uma eficiente alocação de recursos financeiros para o desenvolvimento de médio à longo prazo de projetos hidroagrícolas. Faz-se necessária uma nova abordagem por parte dos planos de bacias hidrográficas para que informações como as geradas por este estudo possam não só fazer parte dos documentos, mas também serem utilizadas por corpos técnicos nas concessões de outorga e cobrança pelos recursos hídricos, outros instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos.

4. CONCLUSÃO

A calibração dos níveis freáticos a partir de dados de precipitação, evapotranspiração e cota fluviométrica permitiu a avaliação das estatísticas dos níveis.

Identificou-se uma tendência significativa de decaimento dos níveis freáticos no PZMC e no PZ3 que está atrelada à utilização da água subterrânea, redução da infiltração e aumento do escoamento superficial, consequência das práticas de manejo do solo adotadas. A baixa declividade está influenciando a elevação dos níveis freáticos no PZ2127, uma vez que potencializa o processo de infiltração da água.

Foi verificado que o modelo PIRFICT possibilita um ajuste aceitável para os níveis freáticos a partir dos dados de entrada utilizados. Os erros foram considerados baixos e foi possível caracterizar a relação dinâmica de impulso resposta entre as variáveis explicativas e os níveis observados. O modelo permitiu a caracterização das respostas nos níveis freáticos quando submetidos a precipitação. Mostrou-se que o fator de resposta

e o período de influência do estímulo estão relacionados à profundidade do solo e dos níveis freáticos, e à distância do poço para o rio. O melhor ajuste do modelo obtido para o PZ2127 sugere que a inserção dos dados de cota fluviométrica de estação localizada nas proximidades do poço, somada as demais variáveis, pode melhorar o desempenho do modelo. Os erros tendem a ser mais elevados para áreas com maiores amplitudes dos níveis freáticos, fator a ser levado em consideração na análise dos ajustes gerados pelo modelo.

Como limitações deste estudo, pode-se citar o fato de a bacia hidrográfica possuir pequena área e, conseqüentemente, os poços estarem relativamente próximos aos divisores topográficos. Eles podem não coincidir com os divisores freáticos, que podem mudar de acordo com as flutuações dos níveis freáticos e a estrutura geológica. Deste modo, quando estes divisores não são coincidentes, pode haver fuga de água para uma bacia hidrográfica vizinha, influenciando os resultados.

Ressalta-se que, para realização de uma gestão eficiente das águas subterrâneas em bacia hidrográficas rurais, tendo em vista seus diferentes usos da terra e demandas das atividades nelas desenvolvidas, faz-se necessária a realização de monitoramento e estudos para análise do comportamento dos níveis. As informações obtidas com a modelagem dos níveis freáticos mostraram-se importantes para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos locais por relacionar a variabilidade climática à dinâmica das águas subterrâneas na bacia hidrográfica, permitindo uma avaliação abrangente das características deste sistema inserido no bioma Mata Atlântica. Os conhecimentos gerados podem ser aplicados em comparação com estudos desta temática desenvolvidos neste e em outros biomas, fomentando a discussão científica, em orientação e alerta aos produtores rurais e à população da bacia hidrográfica.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Brasil (Código de Financiamento 001 e Processo 88881.143991/2017-01). O primeiro e o quinto autor agradecem a CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e doutorado, respectivamente. O quarto autor agradece a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pela bolsa de pesquisa (Matrícula 06.03121-801).

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ALGAYDI, B. A. M.; SUBYANI, A. M.; HAMZA, M. H. M. M. Investigation of Groundwater Potential Zones in Hard Rock Terrain, Wadi Na'man, Saudi Arabia. *Groundwater*, v. 57, n. 6, p. 940-950, 2019. <https://doi.org/10.1111/gwat.12870>

BAKKER, M.; SCHAARS, F. Solving groundwater flow problems with time series analysis: you may not even need another model. *Groundwater*, v. 57, n. 6, p. 826-836, 2019. <https://doi.org/10.1111/gwat.12927>

BUSTAMANTE, J.; ARAGONES, D.; AFAN, I. Effects of protection level in the hydroperiod of water bodies on Donana's aeolian sands. *Remote Sensing*, v. 8, p. 867, 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8100867>

CLEARY, R. W. *Águas subterrâneas*. Tampa, 2007.

DIMITRIOU, E.; MOUSSOULIS, E.; DÍAZ-PANIAGUA, C.; SER-RANO, L. Hydrodynamic numerical modelling of the water level decline in four temporary ponds of the Doñana National Park (SW Spain). *Journal of Arid Environments*, v. 147, p. 90-102, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.004>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Solos do estado de Santa Catarina*. Rio de Janeiro, 2004.

GUNAWARDHANA, L. N.; KAZAMA, S. Statistical and numerical analyses of the influence of climate variability on aquifer water levels and groundwater temperatures: the impacts of climate change on aquifer thermal regimes. *Global and Planetary Change*, v. 86-87, p. 66-78, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.02.006>

HEALY, R. W. *Estimating groundwater recharge*. Cambridge, 2010. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511780745>

HOCKING, M.; KELLY, B. F. J. Groundwater recharge and time lag measurement through Vertosols using impulse response functions. *Journal of Hydrology*, v. 535, p. 22-35, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.042>

KARAMOUZ, M.; NAZIF, S.; FALAHI, M. *Hydrology and hydroclimatology: principles and applications*. Boca Raton, 2013. <https://doi.org/10.1201/b13771>

KENDALL, M. G. *Rank correlation methods*. London, 1975.

LAUS NETO, J. A. *Inventário de terras: microbacia Concórdia*. Relatório do Programa de Recuperação Ambiental e de Apoio ao Pequeno Produtor Rural 2. Florianópolis, 2005. 54 p.

LEHSTEN, D.; VON ASMUTH, J. R.; KLEYER, M. Simulation of water level fluctuations in kettle holes using a time series model. *Wetlands*, v. 31, p. 511-520, 2011. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0174-7>

LOWEN, R. A. (2016). *Mecanismos de geração de escoamento superficial na bacia do rio Concórdia, Lontras - SC*. 2016. 86 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental)-Fundação Universidade Regional de Blumenau, Santa Catarina, 2016.

LUBITZ, E.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Simulação do transporte de sedimentos, nitrogênio e fósforo na bacia do ribeirão Concórdia, SC. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 2, p. 39-54, 2013. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v18n2.p39-54>

MANN, H. B. Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, v. 13, p. 245-259, 1945. <https://doi.org/10.2307/1907187>

MANZIONE, R. L.; MARCUZZO, F. F. N.; WENDLAND, E. C. Integração de modelos espaciais e temporais para predições de níveis freáticos extremos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, p. 1368-1375, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900022>

MANZIONE, R. L. Physical-based time series model applied on water table depths dynamics characteristics simulation. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 23, n. 7, 2018. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0318170071>

MANZIONE, R. L.; SOLDERA, B. C.; WENDLAND, E. C. Groundwater system response at sites with different agricultural land uses: case of the Guarani Aquifer outcrop area, Brotas/SP-Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, v. 62, p. 28-35, 2017. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1154148>

NAVA, A.; MANZIONE, R. L. Resposta de Níveis Freáticos do Sistema Aquífero Bauru (Formação Adamantina) em função da

- precipitação e evapotranspiração sob diferentes usos de terra. *Águas Subterrâneas*, v. 29, n. 2, p. 191-201, 2015. <https://doi.org/10.14295/ras.v29i2.28402>
- OH, Y. Y.; YUN, S. T.; SOONYOUNG, Y.; HAMM, S. Y. The combined use of dynamic factor analysis and wavelet analysis to evaluate latent factors controlling complex groundwater level fluctuations in a riverside alluvial aquifer. *Journal of Hydrology*, v. 555, p. 938-955, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.070>
- OMRAN, E. S. E. A stochastic simulation model to early predict susceptible areas to water table level fluctuations in North Sinai, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, v. 19, n. 2, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.03.001>
- ORGANIZATION OF AMERICAN STATES/GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY (OAS/GEF). *Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible Integrado del SAG*. Montevideo, 2001.
- PIAZZA, G. A.; DEPINE, H.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V.; GONCALVES JUNIOR, A. C.; OLIVEIRA, M. H. C. Spatial distribution of soil attributes in the Concórdia river watershed in Southern Brazil. *Environmental Quality Management*, v. 24, p. 1-12, 2014. <https://doi.org/10.1002/tqem.21385>
- PIAZZA, G. A. *Padrões hidroclimáticos e da qualidade da água de uma bacia hidrográfica com agricultura familiar no Bioma Mata Atlântica, sul do Brasil*. 2019. 170 p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Fundação Universidade Regional de Blumenau, Santa Catarina, 2019.
- ROBSON, T. *Lake Water - Groundwater Interaction at Lake Tutchewop, North-western Victoria, Australia*. 2015. 363 p. Tese (Doctor of Philosophy) – La Trobe University, VIC, 2015.
- ROBSON, T.; WEBB, J. A. The effect of lake loading on groundwater levels around Lake Tutchewop in the Murray-Darling Basin, southeastern Australia. In: IAH 2012 International Congress, 2012, Niagara Falls, ON. [Anais...] Niagara Falls, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236325469_The_effect_of_lake_loading_on_groundwater_levels_around_Lake_Tutchewop_in_the_Murray-Darling_Basin_southeastern_Australia. Acesso em: 11 dez. 2019.
- SAMANI, Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 126, n. 4, p. 265-267, 2000. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:4\(265\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265))
- SILVA, R. C. F.; MANZIONE, R. L. Aplicação do modelo Hartt no estudo das oscilações dos níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru (SAB) sob vegetação de cerrado. *Águas Subterrâneas*, v. 30, p. 362-374, 2016. <https://doi.org/10.14295/ras.v30i3.28586>
- SOLDERA, B. C.; MANZIONE, R. L. Modelagem de níveis freáticos no Sistema Aquífero Bauru como ferramenta na gestão de recursos hídricos subterrâneos. *Ciência Geográfica*, v. 16, n. 1, p. 54-61, 2012.
- TERAMOTO, E. H.; CHANG, H. K. Métodos WTF e simulação numérica de fluxo para estimativa de recarga – exemplo Aquífero Rio Claro em Paulínia/SP. *Águas Subterrâneas*, v. 32, n. 2, p. 173-180, 2018. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i2.28943>
- TORRES, E. *Fluxo de CO₂ e CH₄ do sistema solo-atmosfera e estoque de carbono do solo na bacia hidrográfica do rio Concórdia em função do uso do solo*. 2016. 98 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Fundação Universidade Regional de Blumenau, Santa Catarina, 2016.
- VAERET, L.; KELBE, B.; HALDORSEN, S.; TAYLOR, R. H. A modeling study of the effects of land management and climatic variations on groundwater inflow to Lake St Lucia, South Africa. *Hydrogeology Journal*, v. 17, p. 1949-1967, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0476-5>
- VON ASMUTH, J. R.; BIERKENS, M. F. P.; MAAS, C. Transfer function noise modelling in continuous time using predefined impulse response functions. *Water Resources Research*, v. 38, n. 12, p. 23.1-23, 2002. <https://doi.org/10.1029/2001WR001136>
- VON ASMUTH, J. R.; KNOTTERS, M. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. *Journal of Hydrology*, v. 296, n. 1-4, p. 118-34, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.015>
- VON ASMUTH, J. R.; MAAS, K.; BAKKER, M.; PETERSEN, J. Modeling time series of ground water head fluctuation subjected to multiple stresses. *Groundwater*, v. 46, n. 1, p. 30-40, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00382.x>
- VON ASMUTH, J. R.; MAAS, K.; KNOTTERS, M.; BIERKENS, M. F. P.; BAKKER, M.; OLSTHOORN, T. N.; GIJSBERTCIRKEL, D.; LEUNK, I.; SCHAARS, F.; VON ASMUTH, D. C. Software for hydrogeologic time series analysis, interfacing data with physical insight. *Environmental Modelling & Software*, v. 38, p. 178-190, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.06.003>
- WADA, Y.; BIERKENS, M. F. P.; DE ROO, A.; DIRMEYER, P. A.; FAMIGLIETTI, J. S.; HANASAKI, N.; KONAR, M. LIU, J. MÜLLER SCHMIED, H.; OKI, T.; POKHREL, Y.; SIVAPALAN, M.; TROY, T. J.; VAN DIJK, A. I. J. M.; VAN EMMERIK, T.; VAN HUIJGEVOORT, M. H. J.; VAN LANEN, H. A. J.; VÖRÖSMARTY, C. J.; WANDERS, N.; WHEATER, H. Human-water interface in hydrological modelling: Current status and future directions. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, n. 8, p. 4169-4193, 2017. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4169-2017>
- WANG, Q.; WU, J.; LEI, T.; HE, B.; WU, Z.; LIU, M.; MO, X.; GENG, G.; LI, X.; ZHOU, H. Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale. *Quaternary International*, v. 349, p. 10-21, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.06.021>
- YEH, H. F.; LEE, C. H.; HSU, K. C.; CHANG, P. H. GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. *Environmental Geology*, v. 58, p. 185-195, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1504-9>
- YIHDEGO, Y.; WEBB, J. A. Characterizing Groundwater Dynamics Using Transfer Function- Noise and Auto-Regressive Modeling in Western Victoria, Australia. In: IASME/WSEAS International Conference on Water Resources, Hydraulics & Hydrology, 5, 2010, Cambridgeshire. *Anais...* Cambridgeshire, 2010. 6 p. Disponível em: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Cambridge/WHGE/WHGE-13.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2019. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0726-1>
- YIHDEGO, Y.; WEBB, J. A. Modeling of bore hydrographs to determine the impact of climate and land-use change in a temperate subhumid region of southeastern Australia. *Hydrogeology Journal*, v. 19, p. 877-887, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0726-1>
- ZAADNOORDIJK, W. J.; BUS, S. A. R.; LOURENS, A.; BEREN DRECHT, W. L. Automated Time Series Modeling for Piezometers in the National Database of the Netherlands. *Groundwater*, v. 57, n. 6, p. 834-843, 2019. <https://doi.org/10.1111/gwat.12819>